

УДК 669.35'24'4 : 669.045.2

## **О ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ НАГРЕВА ПРИ ОТЖИГЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО НЕЙЗИЛЬБЕРА**

Д.А. Мирзаев (1), Чжоу Цзюнь (2), К.Ю. Окишев (1)  
e-mail: mirzayev@physmet.susu.ac.ru

(1) Челябинский филиал Института металлургии УрО РАН, г. Челябинск, Россия

(2) Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Статья поступила 29 сентября 2004 г.

При протягивании проволоки из нейзильбера в холодную ее приходится периодически отжигать при температурах 700...750 °С с целью снятия деформационного упрочнения. Однако, как показано в работах [1, 2], свинцовистый нейзильбер имеет в районе 400 °С очень низкое значение относительного удлинения, что обусловлено воздействием на зародыши микротрещин расплавленного свинца. В этом районе температур предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$  близки друг к другу, хотя, безусловно,  $\sigma_B > \sigma_{0,2}$ . На поверхности проволоки диаметром 6 или 9 мм, свернутой в бунт, действуют напряжения изгиба, ограниченные пределом текучести. Если температура вдоль образующей бунта изменяется более чем на 15...20 К, то этого оказывается достаточным для того, чтобы локальное значение  $\sigma_B$  стало ниже среднего остаточного напряжения. В этом случае происходит разрушение бунтов, впервые отмеченное в [3]. Нагрев бунтов деформированного нейзильбера следует проводить так, чтобы перепад температуры не превосходил 15 К.

Даже если температурное поле печи абсолютно однородное, перепад температуры все же возникает из-за неодинаковой плотности укладки проволоки в разных сечениях бунта. В тех сечениях, где проведена поперечная перевязка бунта, которая удерживает проволоку в изогнутом состоянии, укладка проволоки близка к плотнейшей. В этом случае доля воздушных прослоек близка к 0,093 [4]. Но существуют и участки, где бунт «распушен». Доля воздушных прослоек в таких участках достигает, по нашим оценкам, 40...70 %. Наличие воздушных прослоек существенно влияет на коэффициент теплообмена любой проволоки в бунте с окружающим его горячим воздухом. Для бунтов, содержащих 19 витков проволоки с различной плотностью укладки, в работе [4] были экспериментально измерены значения коэффициента теплообмена, и получено выражение

$$\alpha = \beta \gamma \left( 2,58 \frac{(T_n/100)^4 - (T_R/100)^4}{T_n - T_R} + 3,89 \sqrt[4]{T_n - T_R} \right), \quad (1)$$

где  $T_n$  и  $T_R$  — температуры печи и образца соответственно. Коэффициент  $\beta$  отражает изменение коэффициента теплообмена при переходе от нагрева одиночной проволоки к нагреву бунта. Для крайних витков бунта  $\beta = 0,335$ , для центральной проволоки  $\beta = 0,261$ . Второй коэффициент  $\gamma$  отражает влияние доли воздушных прослоек, то есть расстояния между проволоками, на коэффициент теплообмена, причем для плотной укладки проволок в пучок значение  $\beta$  принято равным единице. Если доля воздушных прослоек составляет 61,7 %, что соответствует

расстоянию в 20 мм между центрами соседних проволок в сечении, то для крайних витков  $\gamma = 1,16$ , а в центре бунта  $\gamma = 1,34$ . Очевидно, что наиболее опасная ситуация в отношении перепада температур возникает для центральной проволоки бунта. Именно для нее будет проведен последующий анализ.

Из-за различия коэффициентов теплообмена в местах поперечной перевязки бунта и местах, где бунт распушен, в условиях нагрева возникает перепад температуры  $\Delta T$  вдоль центрального витка, который будет ниже вычислен в зависимости от скорости нагрева. Итак, необходимо найти решение дифференциального уравнения теплопроводности для бесконечной цилиндрической проволоки диаметром  $2R = 0,009$  м:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где  $T(r, \tau)$  — температура на расстоянии  $r$  от центра сечения проволоки в момент времени  $\tau$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности. Решение нужно найти для так называемого граничного условия третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha (T_{\text{п}} - T_R),$$

где  $T_R = T(\tau, r = R)$ , а  $T_{\text{п}}$  — температура печи, которая изменяется со временем по линейному закону

$$T_{\text{п}} = T_0 + \omega \tau,$$

где  $\omega$  — скорость нагрева. Начальное условие

$$T(r, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0 = \text{const},$$

где  $T_0$  — исходная температура образца и печи;  $T_0 = 295$  К.

Коэффициент теплообмена зависит от температур печи и поверхности проволоки согласно уравнению (1), в котором  $\beta = 0,261$ , а коэффициент  $\gamma$  равен 1 для мест с плотной упаковкой и 1,34 для укладки с долей воздушных прослоек 62 %. Значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности нейзильбера составляют  $\lambda = 36$  Вт/(м·К),  $a = 0,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с [4].

Для отыскания решения мы используем следующий прием: заменим линейный график изменения температуры печи на ступенеобразную линию, возникающую при дискретном изменении температуры печи с шагом  $\delta T_{\text{п}} = 1$  К. Длительность изотермической выдержки печи и проволоки на каждой ступени  $\delta \tau = \delta T_{\text{п}} / \omega$ ; в пределах этого интервала времени можно принять, что происходит нагрев проволоки в условиях постоянного теплового потока. Температура поверхности бесконечного цилиндра на стадии регулярного нагрева, согласно [5], определяется формулой

$$T_R = \frac{qR}{2\lambda} \left( \frac{4a\tau}{R^2} + \frac{1}{2} \right) + T_0.$$

При подстановке в нее  $\tau = \delta T_{\text{п}} / \omega$  найдем температуру поверхности в момент окончания выдержки. Эту температуру будем считать постоянной для следующей ступени нагрева. Рассчитаем коэффициент теплообмена по выражению (1) и тепловой поток как  $q = \alpha (T_{\text{п}} - T_R)$ , и вновь оценим температуру поверхности по окончании второй ступени нагрева, и т.д.

Результаты численных расчетов температуры поверхности для двух образцов с  $\gamma = 1,34$  и  $\gamma = 1$  в зависимости от времени показаны на рис. 1. Эти кривые отражают нагрев разных участков одного витка проволоки в бунте. Очевидно, что когда температура первого образца достигнет 400 °С, второй образец будет иметь более низкую температуру. Разность их температур  $\Delta T_{400}$  увеличивается с ростом скорости нагрева.

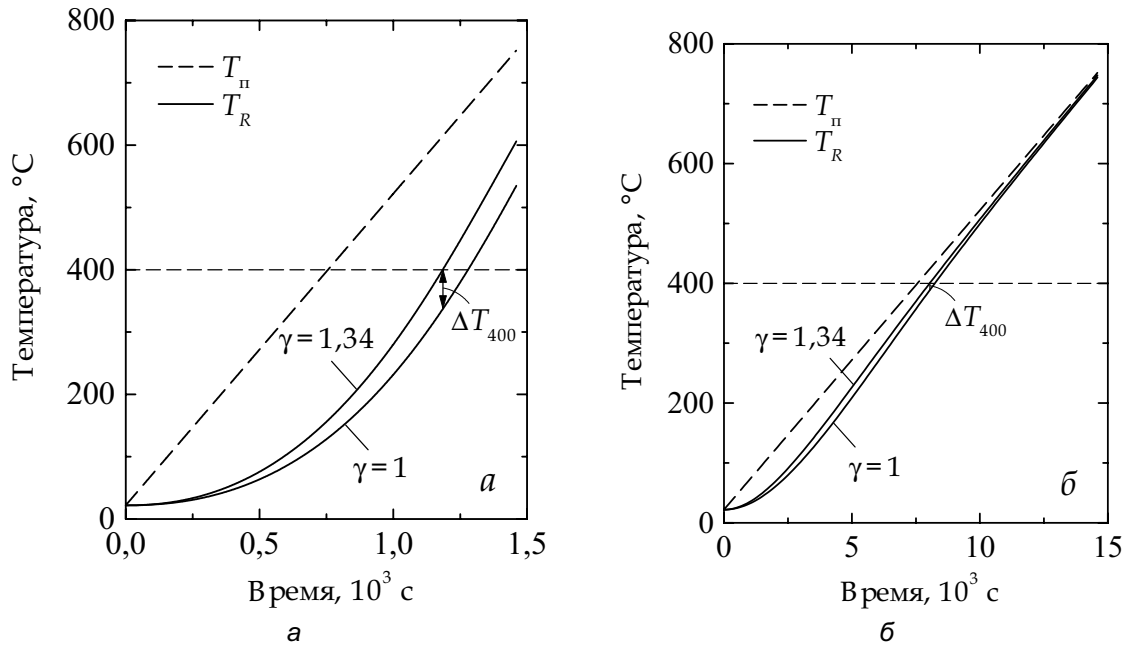


Рис. 1. Рассчитанные зависимости температуры проволоки от времени при нагреве в печи со скоростью  $\omega = 0,5$  К/с (а) и  $0,05$  К/с (б)

Результаты детальных расчетов зависимости перепада температур между образцами от скорости нагрева приведены на рис. 2 (кривая 5). Увеличение скорости нагрева приводит к монотонному увеличению  $\Delta T_{400}$ . Назовем критической скоростью нагрева ( $\omega_{кр}$ ) такую скорость, при которой перепад температур не превышает 15 К. В данном случае он составляет  $0,063$  К/с ( $227$  К/ч). Следовательно, нагрев бунтов деформированной проволоки до температуры рекристаллизации  $700...750$  °С следует проводить со скоростью не более  $227$  К/ч.

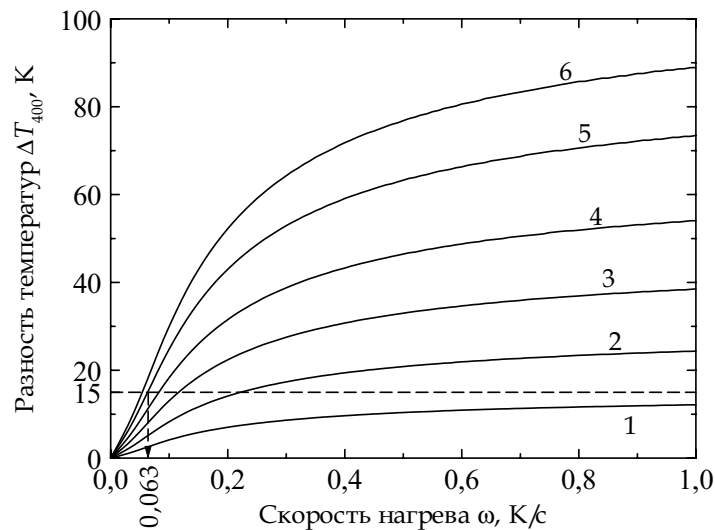


Рис. 2. Рассчитанная разность температур между участками проволоки с  $\gamma = 1,34$  и  $\gamma = 1$  в момент, когда температура проволоки достигает  $400$  °С, в зависимости от скорости нагрева:

1 — при  $f = 20\%$ ; 2 — при  $f = 30\%$ ; 3 — при  $f = 40,1\%$ ; 4 — при  $f = 50\%$ ; 5 — при  $f = 61,7\%$ ; 6 — при  $f = 68,3\%$

Величина критической скорости зависит от плотности укладки витков проволоки в бунте. Принятое при расчетах значение доли воздушных прослоек  $f = 61,7\%$  не всегда точно отражает реальную ситуацию. Можно использовать экспериментально измеренные значения коэффициента  $\gamma$  для различных  $f$ , приведенные в работе [4], и оценить критические скорости в этих

вариантах укладки проволоки в бунт. Зависимости перепада температур  $\Delta T_{400}$  приведены на рис. 2, а значения  $\omega_{кр}$  — в табл. Их можно использовать при выборе режима нагрева бунтов деформированной проволоки из свинцовистого нейзильбера.

Критические скорости нагрева при различной плотности укладки проволоки в бунте

Доля воздушных прослоек $f$ , %	Критическая скорость нагрева $\omega_{кр}$	
	К/с	К/ч
20	—	—
30	0,222	800
40,1	0,116	417
50	0,082	296
61,7	0,063	227
68,3	0,054	194

## Заключение

В статье, на основании ранее измеренных коэффициентов теплообмена, рассчитана скорость нагрева бунтов проволоки, при которой перепад температур не будет превышать допустимой величины, в зависимости от плотности укладки бунта.

## Список литературы

1. Мирзаев Д.А., Чжоу Цзюнь, Яковлева И.Л. и др. Тепловая хрупкость свинецсодержащего нейзильбера // Изв. Челябинского науч. центра, 2002. Вып. 3 (16). С. 39—42.
2. Мирзаев Д.А., Чжоу Цзюнь, Яковлева И.Л., Окишев К.Ю. Причины разрушения бунтов проволоки из нейзильбера в процессе нагрева // Изв. Челябинского науч. центра, 2004. Вып. 1 (22). С. 91—95.
3. Бобылев А.В. Растрескивание медных сплавов (причины, устранение, контроль). М.: Металлургия, 1993. 352 с.
4. Мирзаев Д.А., Чжоу Цзюнь, Корягин Ю.Д., Окишев К.Ю. Зависимость коэффициента теплообмена от плотности укладки проволок в нагреваемом бунте // Изв. Челябинского науч. центра, 2004. Вып. 3. С. 20—25.
5. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металлургиздат, 1962. 568 с.